

Análisis de las pérdidas de calor en secadores de mineral laterítico mediante el Método de Elementos Finitos

Raymundo Betancourt Laurencio

Carrera: Ingeniería mecánica.

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

Resumen: Se simuló el comportamiento de la temperatura del mineral laterítico durante el proceso de secado en cilindros rotatorios horizontales, mediante el empleo del Método de Elementos Finitos. A través de las simulaciones realizadas se mostró que el mineral experimenta una variación de su temperatura que se encuentra alrededor de los 740 °C. Los valores obtenidos de la modelación son aproximadamente iguales a los obtenidos por autores anteriores para condiciones similares de trabajo, utilizando el método analítico de determinación del flujo de calor total, mediante las ecuaciones de transmisión de calor. Se realizó una valoración económica del consumo de combustible horario de los secadores (1,600 t/h) (730,48 USD/h) y se expone cómo con la reducción de pérdidas de calor se obtendría un menor consumo de 0,1 t/h; se analizaron los principales impactos ambientales del proceso de secado de mineral.

Palabras clave: Método de Elementos Finitos; secado de mineral; pérdida de calor.

Analysis of the losses of heat in dryers of mineral for the Finite Elements Method

Abstract: In the present work was carried out a wide bibliographical search of the thematic in question, valuing the current state of the drying process. Through the carried out simulations using the Finite Element method has showed that the mineral experiences a variation of their temperature that encounter around the 740 °C. The obtained values of the modelation are approximately equal to the obtained for previous authors for similar conditions of work, using the analytic method of determination of the heat flow, by means of the equations of heat transfers. It carried out a small economic valuation of the consumption of hourly combustible of the dryers (1,600 t/h) (730,48 USD/h) and it is exposes as with the reduction of lost of heat it obtains a smaller consumption of 0.1 t/h, it is analyzed the main environmental impacts of the drying process of mineral.

Key words: Finite Element Method; mineral drying; loss of heat.

Introducción

En la actualidad no se ha logrado implementar, de forma eficiente, el proceso de secado en los cilindros rotatorios de la Planta de Preparación de Mineral de la empresa Comandante René Ramos Latour, debido al alto contenido de humedad presente en el mineral alimentado a los secaderos el cual oscila entre 36 % y 38 %.

En las empresas Comandante René Ramos Latour y Comandante Ernesto Che Guevara la reducción del consumo de portadores energéticos y la optimización de sus procesos inciden considerablemente en la eficiencia de los diferentes equipos e instalaciones que la componen.

Este proceso en las empresas Comandante René Ramos Latour y Comandante Ernesto Che Guevara tiene la finalidad de reducir el contenido de humedad del mineral laterítico hasta valores mínimos, con la mayor eficiencia posible, para facilitar la molienda, lo cual implica grandes variaciones de temperatura y concentraciones a lo largo de las secciones del proceso.

En el presente trabajo se simula el comportamiento de la temperatura y el flujo de calor en los secadores de mineral laterítico durante el proceso de secado en cilindros rotatorios horizontales, mediante el empleo del Método de Elementos Finitos, utilizando el software profesional ANSYS 12.1.

Estudios precedentes

El secado de mineral con el empleo de la energía térmica se ha desarrollado vertiginosamente en el mundo; de acuerdo con las fuentes bibliográficas consultadas (Krisher, 1961; Strumillo, 1975) se destacan dos tendencias fundamentales: el secado bajo parámetros controlados y el secado solar. A este trabajo le ofrece particular interés la primera de ellas.

Esta investigación se inclina hacia aquellos trabajos que tratan criterios sobre el intercambio de calor en cilindros horizontales rotatorios desde el punto de vista científico, técnico y práctico.

Fulford (1969) y Boizán (1991) proporcionaron varios modelos matemáticos tomados de la literatura rusa para describir la cinética del secado. Estos modelos reportados por

diferentes autores (Rezchikov *et al.*, 1966) fueron establecidos considerando la velocidad de secado (N) constante. En todos los casos N se expresa en forma de una función empírica de los parámetros fundamentales del proceso. Estas expresiones no pueden ser aplicadas al secado del mineral laterítico porque en este proceso la velocidad de secado varía y no existe fluidización, además, los materiales experimentados (semillas de tomate, granos y partículas de papa, respectivamente) tienen propiedades termofísicas diferentes a la del sólido estudiado en este trabajo.

Thomas *et al.* (1980) resolvieron las ecuaciones expuestas por Lykov (1954) usando el Método de Elementos Finitos, ellos solucionaron las ecuaciones diferenciales parciales no lineales para los casos donde es posible variar las propiedades de los materiales y también ecuaciones lineales con propiedades constantes de los materiales; compararon los resultados de ambos casos con los de un análisis lineal del secado de una sección de madera y constataron que no había diferencia con los resultados no lineales, de ahí que asumir las propiedades del material constante se justifique en algunos casos. De los resultados obtenidos por estos investigadores se deduce que es posible simplificar el estudio del proceso al asumir constantes las propiedades del material, siempre que el rango de error no exceda las especificaciones propias del proceso estudiado.

Las relaciones empíricas que se obtienen de esta aproximación son, generalmente, insatisfactorias, el autor realizó para ello el diseño de un secador industrial operando con una velocidad del aire de 3 m/s. Las ecuaciones se obtienen con el fin de determinar la cantidad de calor transferido usando un coeficiente de transferencia de calor pelicular, pero en este caso se hace más dudosa el área en que se estima la ocurrencia de la transferencia de calor.

Kallel *et al.* (1993) estudiaron el efecto del contenido de humedad inicial y el coeficiente de transferencia de calor por convección en el secado de ladrillos; emplearon ecuaciones de conservación para líquidos, aire y vapor de agua, similar a las utilizadas por Whitaker (1977). El efecto del flujo capilar en la primera etapa de secado y difusión gaseosa en la última etapa son dados en términos de coeficientes difusivos para los líquidos y vapores. Este aporte no es satisfactorio para predecir el comportamiento del secado del mineral laterítico debido a que las expresiones fueron obtenidas para el proceso continuo y el caso estudiado corresponde al secado periódico.

Ferguson *et al.* (1995) derivaron las ecuaciones de conservación para líquido y aire haciendo aproximaciones continuas para el secado de madera por debajo del punto de ebullición del agua; utilizando la técnica del volumen de control, como un punto de referencia, validaron los resultados obtenidos con el empleo del Método de Elementos Finitos; encontraron ligera diferencia en los resultados de ambos métodos durante la última etapa de secado.

Haciendo uso de los coeficientes de difusividad obtenidos experimentalmente por Perrin *et al.* (1987), Muregesan *et al.* (1996) realizaron predicciones numéricas a partir de un modelo unidireccional para estudiar la variación de la humedad y la temperatura dentro de materiales sólidos durante el secado convectivo, asumiendo propiedades de transporte constantes. En este trabajo se omiten los términos de disipación viscosa y convectiva en las ecuaciones de energía, también se asume que existe equilibrio térmico local entre la matriz del sólido, líquido puro y mezcla gaseosa de aire y vapor. Las simplificaciones realizadas no permiten la generalización de los resultados.

En Cuba se han desarrollado diferentes investigaciones relacionadas con el secado de materiales y productos alimenticios tales como: café, cacao, cebolla, madera, cemento, zeolita, entre otros, todos con resultados satisfactorios para cada uno de estos materiales. Dentro de ellos se puede destacar el trabajo desarrollado por Novoa *et al.* (1995) para el secado de zeolita a escala de laboratorio; en este se obtuvieron ecuaciones empíricas que describen el comportamiento de la cinética del secado del producto, siguiendo el modelo propuesto por Hall (1983); se obtuvo, además, los valores de humedad de equilibrio para diferentes temperaturas y humedad inicial. Finalmente con todos los resultados alcanzados se realizó un software para simular el proceso y predecir su comportamiento bajo determinadas condiciones de operación. También señalaron que la modelación matemática es una herramienta indispensable en el diseño y operación de las plantas químicas, y que ofrece un método numérico para la solución de grandes sistemas de ecuaciones derivados de la modelación de una planta de producción.

Bachir (2001) realizó un balance térmico y de masa para determinar el consumo de combustible tomando el aire frío y los gases de hornos como aire secundario.

Moya (2008) realizó un análisis de las pérdidas y su influencia en el gasto económico por concepto de consumo de combustible en dicha empresa. Dichos secadores son similares para ambas empresas.

Principios generales del análisis de procesos mediante la simulación

La combinación de la computadora y los softwares profesionales conforman la simulación digital, que es una herramienta capaz de solucionar sistemas compuestos por numerosas variables, ecuaciones y parámetros de equipos. Actualmente se han obtenido experiencias útiles en la aplicación de estas técnicas con programas tales como: ANSYS, COSMOS DESIGN y MATLAB. La simulación presupone el conocimiento del comportamiento de los elementos del sistema y se utiliza cuando no es posible, o al menos no es económico, estudiar el sistema real directamente.

Para construir un modelo matemático que represente el proceso bajo estudio se hace uso de los principios físicos y químicos así como de otras relaciones no fundamentales basadas en la experimentación para obtener las ecuaciones que constituyen el modelo. Estas ecuaciones son luego trabajadas para predecir qué efecto se logrará sobre el proceso al tomar los valores deseados en las variables de interés.

Para obtener el modelo matemático que represente el proceso que está siendo investigado es necesario seguir una trayectoria bien definida y desglosada en diferentes pasos, adecuadamente ordenados, los cuales constituyan un enfoque lógico y consistente. El tipo de estructura matemática se utilizará acorde al nivel de detalles del proceso que se representa, y debe ser el resultado de un compromiso entre la complejidad que tenga dicha descripción matemática al abarcar numerosos detalles del proceso y la simplicidad matemática requerida para un fácil y adecuado trabajo del modelo en su aplicación.

Análisis de fenómenos térmicos con el uso del ANSYS

Las simulaciones térmicas juegan un papel importante en el diseño de muchas aplicaciones de ingeniería, incluyendo la combustión interna en motores, turbinas, intercambiadores de calor, sistemas de tuberías y componentes electrónicos. En muchos casos los ingenieros siguen un análisis térmico con un análisis de tensiones para calcular las tensiones térmicas (es decir, tensiones causadas por expansiones térmicas o contracciones).

Modelos térmicos en ANSYS

Sólo los programas ANSYS: Multi-físico, Mecánico, Profesional y Fortran soportan los análisis térmicos.

La base para el análisis térmico en ANSYS es una ecuación de balance de calor obtenida a partir de los principios de conservación de la energía. La solución se obtiene aplicando el Método de Elementos Finitos para calcular las temperaturas nodales y obtener otros parámetros térmicos.

El programa ANSYS contiene los tres modos primarios de transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

Convección

Se especifica la convección como una carga superficial aplicada sobre un elemento sólido o elementos de coraza. Para el cálculo es necesario especificar el coeficiente de convección pelicular y la temperatura en la superficie, entonces ANSYS calcula la transferencia de calor a través de esa superficie. Si el coeficiente pelicular depende de la temperatura, se especifica una tabla de temperaturas junto con los valores correspondientes del coeficiente pelicular.

Para el uso del Método de Elementos Finitos en la convección con elementos de conducción o en el caso en que no se conoce la temperatura del fluido, ANSYS ofrece un elemento de convección nombrado PLANE55 y LINK34. Además, se puede usar el FLOTRAN CFD para simular detalles del proceso de convección, tales como las velocidades del fluido, valores locales del coeficiente pelicular y el flujo de calor, y las distribuciones de temperaturas tanto en fluidos como en las regiones sólidas.

Radiación

ANSYS puede resolver problemas de radiación, que son no lineales, de cuatro maneras:

- Usando el elemento, LINK31.
- Usando efecto de superficie SURF151 para los modelos en 2D o SURF152 para los modelos 3D.

- Generando una matriz de radiación con AUX12 y usándolo como un súper elemento en un análisis térmico.
- Usando el método Solver para la radiosidad.

Además de los tres modos de transferencia de calor con el empleo del ANSYS se pueden tratar otros problemas térmicos relacionados con el cambio de fase.

Análisis de los resultados con la aplicación del Método de Elementos Finitos

En esta investigación se llevaron a cabo simulaciones de un secador cilíndrico rotatorio de mineral en tres dimensiones a través de la serie de pasos que se describen a continuación.

Modelo geométrico

El modelo geométrico, con una configuración básica, se muestra en la Figura 1. En el referido modelo se simplifican varios aspectos como son los levantadores y flujo de mineral, debido principalmente a que la situación problemática que se evalúa es la transferencia de calor desde la superficie al ambiente, considerada también desde el diámetro interior.

El proceso de elaboración se llevó a cabo en el ANSYS Workbench 12.1, en la Tabla 1 se muestran las principales dimensiones utilizadas para la generación del modelo.

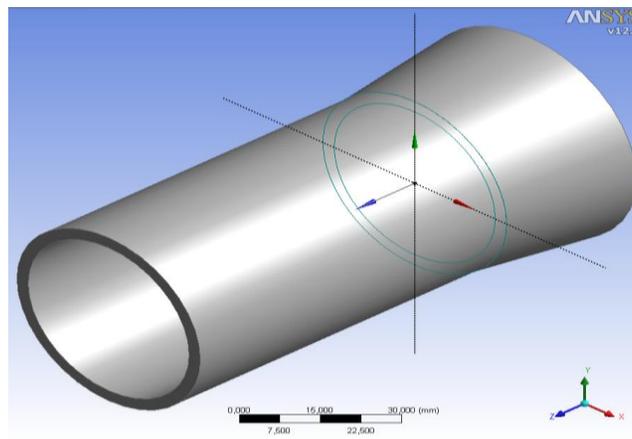


Figura 1. Modelo geométrico básico del secador.

Mallado

Para definir la distribución de los nodos y elementos se establece como material patrón del paquete de ANSYS 12.1; Thermal Mass; Grupo: Solid; tipo definido Brick 8 node 70

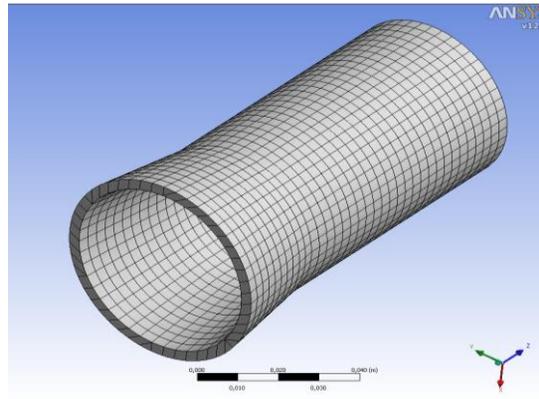


Figura 2. Mallado del secador cilíndrico rotatorio.

Condiciones límites y restricciones

Estas son las condiciones tanto geométricos como de propiedades del material que se utilizan durante la simulación del proceso (Tabla 1).

Tabla 1. Datos que se utilizaron en la simulación

Longitud del secador	40 m
Espesor del secador	0,016 m
Densidad del mineral	3500 kg/m ³
Densidad del material del cilindro	7832 kg/m ³
Conductividad térmica del material de la sección de la botella	27,3 W/m ² ·K
Conductividad térmica del material de la sección del tambor	16,7 W/m ² ·K
Temperatura promedio a la entrada de la botella	860 °C
Temperatura promedio a la salida del cilindro	120 °C
Temperatura promedio del medio ambiente	35 °C
Coefficiente de transferencia de calor por convección promedio	5,329 W/m ² ·K
Emisividad del material del secador cilíndrico	0,22

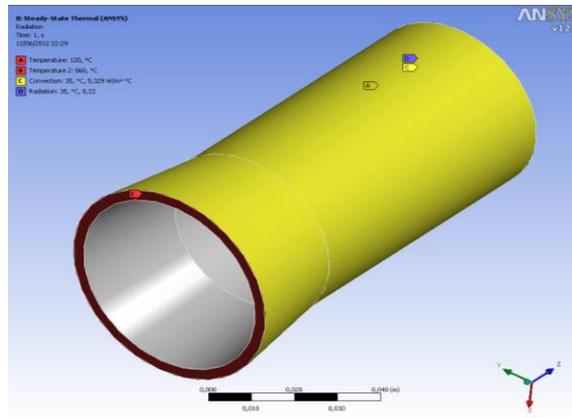


Figura 3. Parámetros iniciales para el inicio de la simulación.

Solución e interpretación de los resultados

La Figura 4 representa la simulación en tres dimensiones del proceso de transferencia de calor que ocurre en los secadores cilíndricos de mineral laterítico de la empresa Comandante René Ramos Latour. Donde se observa que el secador experimenta variación de su temperatura (alrededor de 740 °C); entra al secador a 860 °C, aproximadamente, y sale a 120 °C. Se perciben también las isotermas que describen el proceso de transferencia de calor desde la entrada del mineral a la botella del secador hasta la salida. Toda esta distribución nodal de temperatura está definida fundamentalmente por el mecanismo de transmisión de calor por conducción que se manifiesta entre la entrada y salida del mineral laterítico y está influido por la convección y radiación.

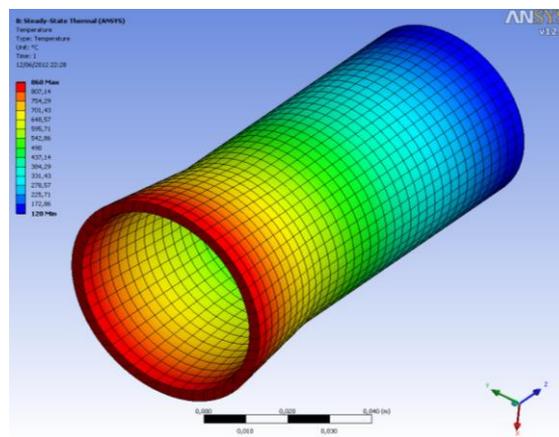


Figura 4. Distribución de la temperatura en el secador cilíndrico horizontal durante el proceso de secado.

Análisis del flujo de calor

El análisis del flujo de calor se realizó en 3D (Figura 5 y 6), siguiendo la misma tendencia de la distribución de temperatura; el flujo de calor se comporta de manera descendente a medida que se avanza longitudinalmente hacia la descarga del mineral. En este caso se ponen de manifiesto dos modos de transmisión de calor por convección y por radiación. Estos valores son aproximadamente iguales a los obtenidos por autores anteriores para condiciones similares de trabajo, utilizando el método analítico de determinación del flujo de calor total, mediante las ecuaciones de transmisión de calor.

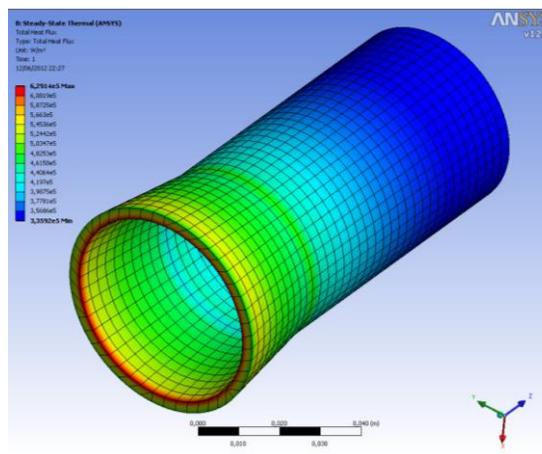


Figura 5. Flujo de calor en el secador cilíndrico horizontal durante el proceso de secado.

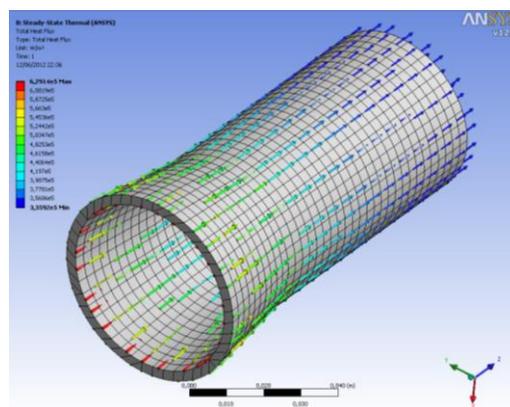


Figura 6. Dirección del flujo de calor en el secador cilíndrico horizontal durante el proceso de secado.

Error Térmico

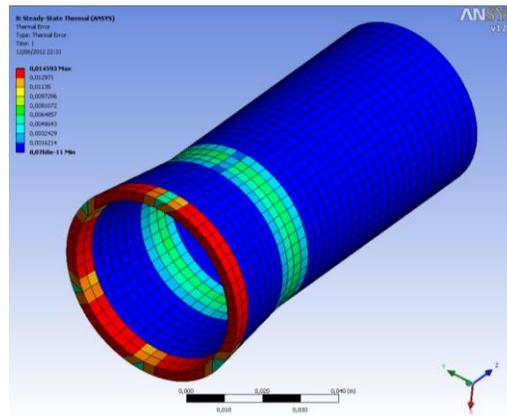


Figura 7. Error térmico de la simulación.

Ventajas y desventajas de la aplicación del Método de Elementos Finitos

El Método de Elementos Finitos permite a los ingenieros obtener información de objetos de formas complicadas bajo casi cualquier carga imaginable (cargas puntuales, de presión, térmicas, fuerzas inerciales, cargas dependientes del tiempo, entre otras). Permite resolver problemas en estado estacionario o dependientes del tiempo, lineales o no lineales: Se pueden manejar materiales especiales: no homogéneos ortotrópicos, anisotrópicos. Se pueden, además, considerar efectos especiales sobre los materiales: plasticidad, propiedades dependientes de la temperatura. A nivel empresarial las ventajas del método son notorias: la etapa de desarrollo de un producto se acorta, se pueden identificar problemas de diseño antes de fabricar un producto, se reducen las etapas de prueba y error en el diseño de un nuevo producto, entre otras.

La principal limitación del Método de Elementos Finitos radica en que la precisión de los resultados depende de la densidad de elementos utilizados. En análisis estructurales, cualquier región con alta concentración de esfuerzos debe ser cuidadosamente analizada mediante un enmallado suficientemente fino para obtener resultados confiables.

Valoración económica

Como se puede apreciar en la Tabla 2 el consumo de combustible horario del secador analizado es de 1,600 t/h y el gasto económico asociado al mismo asciende a 730,48 USD/h.

Para ilustrar con mayor claridad las cuantiosas sumas que el país debe erogar para la compra de combustible el análisis se hace extensivo al período febrero-mayo, se escogen estos meses porque fue el tiempo en que se desarrolló la investigación.

Los resultados mostrados en la Tabla 3 indican la importancia que tienen estos equipos en la empresa, debido a que los mismos son considerados puestos clave para el ahorro de combustible. Al extender el mismo análisis a todos los secadores que trabajan de forma continua en la empresa, y considerando que consumen una cantidad de combustible equivalente, entonces el gasto económico por consumo de combustible para los meses analizados sería de 12 358 720 USD.

Tabla 2. Calor total ingresado por el combustible al secador

Equipos analizados	Consumo de combustible (t/h)	Consumo de combustible (t/día)	Consumo de combustible (t/mes)	Consumo de combustible (t/4 meses)
Secador 1	1,600	38,4	1 152	5 760
	(USD/h)	(USD/día)	(USD/mes)	(USD/4 meses)
Importe	730,48	17 531,52	525 945,6	2 629 728

Estos elevados consumos de combustibles se pueden mitigar disminuyendo las pérdidas de calor al medio ambiente, para ello sería necesario implementar algunas de las acciones que se describen en este trabajo u otras que al efecto resulten, considerando que con la aplicación de estas solo se reduce el consumo de combustible en 0,1 t/h los beneficios serían alentadores. El análisis económico para la referida disminución en el consumo de combustible se refleja en la Tabla 4.

Tabla 3. Análisis económico para una disminución del consumo de combustible en 0,1 t/h

Equipos analizados	Consumo de combustible (t/h)	Consumo de combustible (t/día)	Consumo de combustible (t/mes)	Consumo de combustible (t/4 meses)
Secador 1	1,500	36	1 080	5 400
	(USD/h)	(USD/día)	(USD/mes)	(USD/4 meses)
Importe	696	16 704	501 120	2 505 600

Principales problemas ambientales detectados en la planta donde se realiza el secado

-La zona de preparación de mineral (depósito de homogenización, transportadores de banda, hasta la sección de molinos), constituyen áreas de contaminación por polvo.

-Los gases que salen de los electrofiltros de cada secador contienen CO (0,4 %) y SO₂ y aunque cumplen las normas deben ser controlados en ese nivel, como máximo, mediante un monitoreo periódico. En estos momentos están presentando fallas y los secadores están directamente a la atmósfera.

-El agua en los pisos de los secadores es enviada a la canalización (contienen sólidos y grasas).

-En el área de dosificación y mezclado de petróleo existe una fuente de contaminación por derrame y vaporización.

-El sistema de transporte traslada el mineral secado caliente y posee un sistema de aspiración en la descarga de una correa a otra, pero no es eficiente. La recogida de polvo derramado se realiza manualmente (hay gran cantidad de polvo en suspensión).

-En ocasiones se supera la norma de concentración de polvo (30 mg de polvo/m³), por esto se deben realizar determinaciones de polvo en la atmósfera en el área de trabajo.

Conclusiones

El procedimiento para la simulación numérica, con el empleo del Método de Elementos Finitos de procesos térmicos en el software profesional ANSYS 12.1, ya se encuentra preestablecido dentro del motor o matriz de cálculo del software. Este procedimiento se apoya fundamentalmente en las ecuaciones de transferencia de calor de los tres modos fundamentales del mismo: conducción, convección y radiación, que se combinan a partir de la primera Ley de la Termodinámica.

Los resultados que se obtienen, aplicando el Método de Elementos Finitos para calcular las temperaturas nodales y el flujo de calor mediante el software ANSYS 12.1, muestran el comportamiento de estos parámetros a lo largo del secador. El secador

experimenta una variación de su temperatura, desde 860°C hasta 120 °C, en la entrada y salida, respectivamente. El flujo de calor máximo obtenido es de $6,2914 \times 10^5$ W y el mínimo $3,3592 \times 10^5$ W. Resultados equivalentes a los obtenidos por autores anteriores mediante el método analítico.

El gasto económico por concepto de consumo de combustible asociado a los secadores analizados asciende a 12 358 720 USD para los cuatro meses considerados. Además de este valor hay que considerar también gastos económicos por las pérdidas de materia prima y otros insumos en la planta.

Referencias bibliográficas

- BACHIR, H. 2001: Balance térmico y de masa del secador # 3 en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Proyecto de curso. ISMM. 36 p.
- BOIZÁN, M. 1991: *Macrocínética del secado de Bagazo*. Ediciones ISPJAM, Santiago de Cuba, 145 p.
- FERGUSON, W. & TURNER, J. 1995: A comparison of the finite element and control volume numerical solution techniques applied to timber drying problems below the boiling point. *Int. J. Num. Methods Eng.* 38: 451-467.
- FULFORD, G. 1969: A survey of recent soviet research on the drying of solids. *Can. J Chem. Eng.* 47: 378-491.
- HALL, C. 1983: *Drying technology An International Journal*. New York.
- KALLEL, F.; GALANIS, N.; PERRIN, B. & JAVELAS, R. 1993: Effects of Moisture on temperature during drying of consolidated porous materials. American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, ETATS-UNIS vol. 115, n°3, pp. 724-733
- KASATKIN, A. 1987: *Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química*. Segunda parte. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, p. 262-366.
- KRISHER, O. 1961: *Fundamentos científicos de la técnica del secado*. Editorial Izdatinlit, Moscú.

- LYKOV, A. 1954: *Fenómenos del transporte en cuerpos capilaroporosos*. Editorial gostejizdat, Moscú.
- MOYA, A. 2008: Determinación de las pérdidas de calor en los secaderos de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Tesis de Diploma. ISMM. 49 p.
- MUREGESAN, K. & SEETHARAMU, N. 1996: A one dimensional analysis of convective drying of porous materials. *Heat and Mass Transfer* 32: 81-88.
- NOVOA, R. & BOIZÁN, M. 1995: Secado de zeolita a escala de laboratorio (III). *Revista Tecnología Química* 1: 24-29,
- PERRIN, B. & JAVELAS, D. 1987: Transferts couples de chaleur et de masse dans les materiaux consolides utilises en Genie Civil. *Int. J. Heat Mass Transfer* 30: 297-309.
- REZCHIKOV, V. & GUINSBURG, A. 1966: *Secado de productos alimenticios en cama fluidizante*. Editorial Pischevaya Promyshlennost, Moscú.
- STRUMILLO, C. 1975: *Fundamentos de la teoría y práctica del secado*. Editorial W.N.T., Varsovia.
- THOMAS, H; MORGAN, K. & LEWIS, R. 1980: A Fully nonlinear analysis of heat and mass transfer problems in porous bodies. *Int. J. Num. Methods Eng.* 15: 381-393.